

SISMOTECTONICA DE LA FALLA DE ALHAMA DE MURCIA. IMPLICACIONES SISMOGENETICAS DEL TERREMOTO DE LORCA DE JUNIO-1977 (Mb: 4,2)

J. J. Martínez-Díaz *

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio sismotectónico de la falla oblicua (inverso-direccional) de Alhama de Murcia y su entorno. Se analiza la distribución espacial y temporal de la sismicidad histórica e instrumental en el entorno de la falla y se reinterpreta la génesis de la serie sísmica de Lorca ocurrida en junio de 1977 (Mb: 4,2), que se explica desde un punto de vista tectónico, relacionando su mecanismo de foco de tipo extensional, con la estructura neotectónica de la zona epicentral. Se propone un modelo para la génesis de este evento relacionado con el levantamiento y plegamiento de la Sierra de las Estancias asociado a la actividad inverso-direccional de la FAM. En el bloque levantado se pueden producir dos efectos que explican un tensor local extensional: ganancia de espacio lateral en el bloque levantado por la falla, y procesos de flexión asociados a la componente inversa. La conexión dinámica entre la actividad inverso-direccional de la FAM y la actividad normal de las fallas incluidas en el bloque levantado por ella, puede generar terremotos de Mb > 4,0. De ello se desprende que en las evaluaciones de peligrosidad sísmica resulta imprescindible el estudio de las relaciones dinámicas entre la actividad de la fracturación secundaria y la actividad de las fallas de primer orden que son el motor cinemático que puede disparar la actividad en aquéllas.

Palabras clave: *Cordillera Bética, Falla de Alhama de Murcia, Falla de Lorca, sismotectónica, peligrosidad sísmica, fracturación secundaria, neotectónica, falla activa.*

ABSTRACT

A seismotectonic study of the oblique slip (*strike-slip-reverse*) Alhama de Murcia Fault (FAM) is presented. The spatial and temporal distribution of historical and instrumental seismicity around the fault is analysed. The Lorca (1977, Mb 4.2) seismic sequence is interpreted in order to explain the extensional focal mechanism of the mainshock, under a compressional stress field. A model in which local extension occurs in the hanging wall, due to reverse movement of Alhama de Murcia Fault, is proposed to explain the earthquake. The hanging wall suffers a lateral extension due to free lateral space increase and/or flexion. The dynamic link of FAM activity with small normal faults, located inside the hanging wall, may produce earthquakes with Mb > 4.0. In that way, seismic risk assessment studies must take into account the dynamic relations of second order active faults with the major faults, that are the true kinematic engine triggering activity on them.

Key words: *Betic Cordillera, Alhama de Murcia Fault, Lorca Fault, seismotectonics, seismic risk, secondary faulting, neotectonics, active fault, reverse fault.*

Introducción

La Falla de Alhama de Murcia (FAM) es una de las fallas activas de mayor longitud de la Península

Ibérica. Las observaciones de tipo neotectónico y paleosísmico, así como la sismicidad histórica asociada a la FAM (cinco terremotos de intensidad VIII en los últimos 400 años) hacen de esta falla una de

* Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid. e-mail: jmdiaz@eucmax.sim.ucm.es

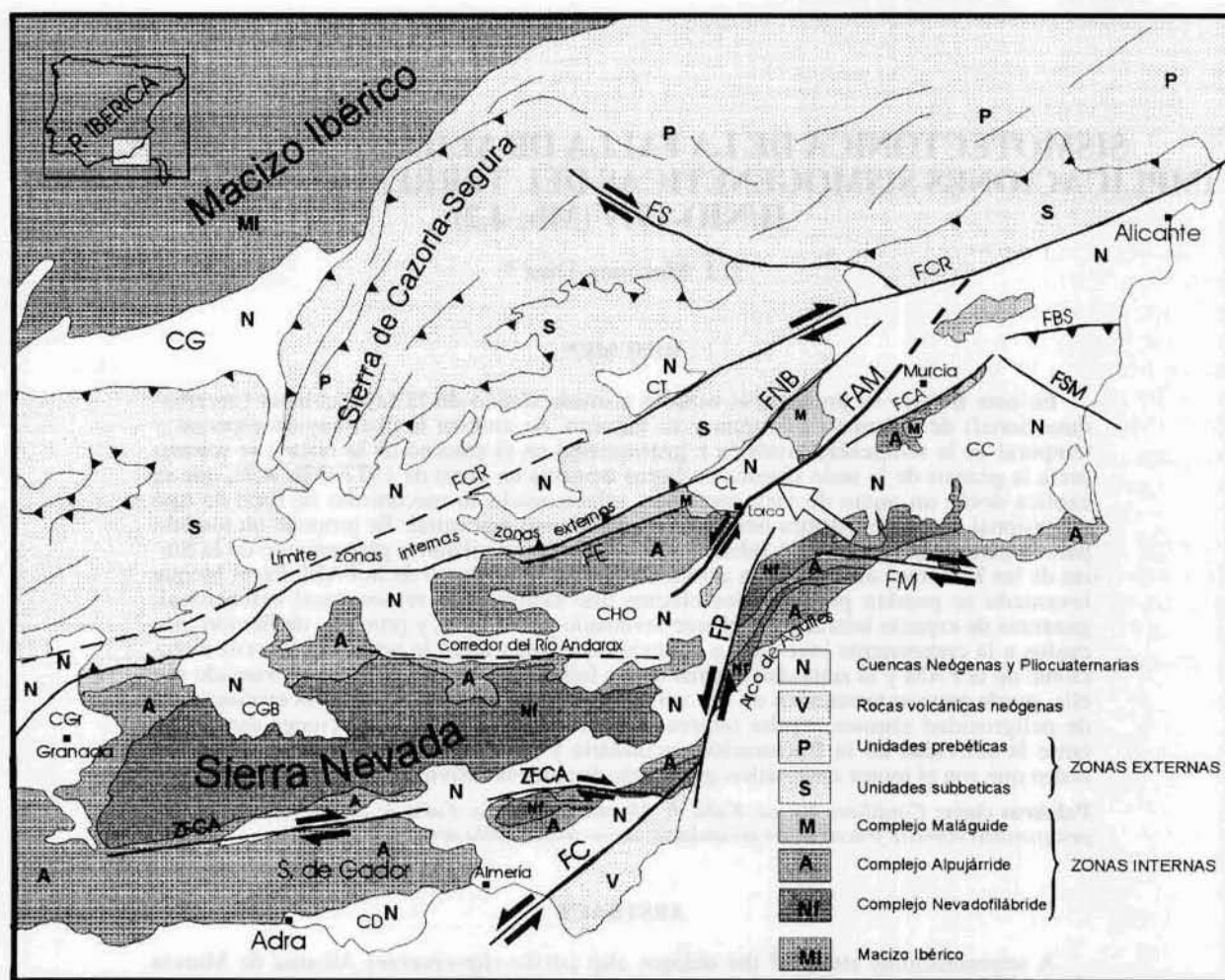


Fig. 1.—Mapa geológico del sureste de la Cordillera Bética en el que se señalan los principales corredores de fracturación neotectónica, entre ellos la Falla de Alhama de Murcia (marcada con una flecha). FS: Falla de Socovos; FCR: Falla de Crevillente; FE: Falla de las Estancias; FNB: Falla Norbética; FAM: Falla de Alhama de Murcia; FCA: Falla de Carrascoy; FBS: Falla del Bajo Segura; FSM: Falla de San Miguel; FM: Falla de las Morenas; FP: Falla de Palomares; FC: Falla de Carboneras; ZFCA: Zona de falla del Corredor de las Alpujarras; CGB: Cuenca de Guadix-Baza; CD: Campo de Dalías; CGR: Cuenca de Granada; CHO: Cuenca de Huércal Overa; CL: Cuenca de Lorca; CC: Campo de Cartagena; CT: Cuenca de Tarragona.

las más activas desde el punto de vista sismogénico. En este sentido, y teniendo en cuenta el marco geodinámico en que se encuentra (la velocidad de acercamiento entre las placas Euroasiática y Africana en este sector no supera los 4 mm/a [Argus *et al.*, 1989]), la velocidad de movimiento de esta falla es relativamente pequeña: de 0,1 a 0,3 mm/a (Martínez Díaz, 1998).

En sectores como la Cordillera Bética donde los períodos de recurrencia de los terremotos de magnitud 5,5 son superiores a 200 años, las reactivaciones cosísmicas, tanto de segmentos aislados de las grandes fallas como de fallas secundarias de dimensiones reducidas (de 1 a 20 km), pueden inducir eventos de magnitudes próximas o incluso

ligeramente superiores a 5,0, e intensidades superiores a VI, con períodos de recurrencia menores (inferiores a 100 años). Con este trabajo se pretende llamar la atención, no solamente sobre la potencialidad sismogénica de la FAM, sino también sobre la importancia sismogénica que pueden presentar las fallas secundarias asociadas a ella. En este sentido, en los últimos años está creciendo a nivel mundial el interés en los estudios que investigan los mecanismos de modificación de los esfuerzos efectivos en el entorno de una falla en el momento en que se reactiva sísmicamente. Algunos de estos estudios se han enfocado a los fenómenos por los cuales un terremoto producido en una falla puede inducir otro terremoto

en una falla próxima (*triggering*) y están obteniendo resultados muy esperanzadores (Stein *et al.*, 1992 y 1994; Harris y Simpson, 1992; King *et al.*, 1994; Harris *et al.*, 1995; Hodgkinson *et al.*, 1996; Stein *et al.*, 1997; Nostro *et al.*, 1998; Toda *et al.*, 1998).

En España, aún no se han estudiado relaciones sismogenéticas dinámicas de este tipo, sin embargo, la alta densidad de fracturación activa durante el período neotectónico existente en la Cordillera Bética hacen de ésta una zona potencialmente interesante. La actividad sismogenética de la Falla de Alhama de Murcia a lo largo de su historia y, más concretamente, la serie sísmica de Lorca de junio de 1977 (Mb: 4,2) que se tratará en detalle, aportan interesantes evidencias a la hora de analizar este tipo de relaciones sismogenéticas entre fallas de primero y de segundo orden. El estudio que aquí se presenta forma parte, de fase inicial de investigación, previa a la aplicación de modelizaciones de esfuerzos en un sector de la Cordillera Bética con vistas a la identificación de procesos de interacción sísmica entre fallas activas.

Marco geológico y antecedentes

La Falla de Alhama de Murcia (FAM) fue identificada y nombrada en primer lugar por Bousquet y Montenat (1974). En trabajos previos realizados por autores holandeses y franceses (Fallot, 1948; Fernex, 1964; Kampschuur, 1972, entre otros) ya se identificaron zonas de fracturación frágil que distorsionaban con su actividad la estructura de apilamiento de mantos propia de las fases de deformación alpinas; si bien no se individualizaron como zonas de falla concretas con una cinemática determinada.

La FAM constituye un importante corredor tectónico de carácter cortical (Larouzière *et al.*, 1988) que atraviesa una parte importante del sureste de la Cordillera Bética con una dirección que oscila entre N 45 E y N 65 E (fig. 1). A lo largo de su recorrido flanquea varias cuencas sedimentarias neógenas de carácter inicialmente marino, que han ido evolucionando a lo largo del Mioceno superior y Plioceno hacia ambiente litoral y continental (Montenat, 1973; 1977). Su traza superficial puede seguirse a lo largo de más de 100 km desde el límite norte de la depresión de Huércal-Overa al SO, hasta las proximidades de Murcia al NE. A partir de un estudio geofísico del sector nororiental Gauyau (1977) identificó la continuación de la FAM por debajo de depósitos pliocuaternarios del valle del Segura hasta las proximidades de la falla de Crevillente, al este de Abanilla.

La FAM comenzó considerándose como un accidente fundamentalmente de desgarre sinistoso y dirección NE-SO (Bousquet y Montenat, 1974). En los distintos estudios realizados sobre esta falla durante las últimas décadas, se ha puesto de manifiesto, sin embargo, una cinemática de desgarre sinistoso con componente inversa, activa durante el Mioceno superior, el Plioceno y el Cuaternario (Montenat *et al.*, 1987a y b). En los últimos años se han venido realizando estudios de la FAM que hacen especial hincapié en el análisis de la tectónica activa asociada al corredor, las posibles estructuras cosísmicas asociadas a la misma y sus implicaciones en la peligrosidad sísmica de la zona (Oliveros, 1987; Martínez Díaz, 1991; Martínez Díaz y Hernández Enrile, 1992 y 1996; Baena *et al.*, 1993; Rodríguez Estrella, 1986; Rodríguez Estrella *et al.*, 1992; Silva, 1994; Silva *et al.*, 1992 y 1997. En todos estos trabajos se considera un régimen tectónico compresivo más o menos continuado durante el Mioceno superior y Pliocuaternario, con una dirección de máximo acortamiento N 150°.

El sureste de la Cordillera Bética ha sido objeto de escasos estudios de carácter sismotectónico entendiendo como tales aquellos estudios de la actividad sísmica, tanto histórica como instrumental, combinados con la geología estructural, con el objetivo de relacionar dicha actividad con la tectónica de la zona, tanto desde un punto de vista cinemático como dinámico. La mayoría de los estudios se centran en análisis de carácter regional, cuya escala de trabajo impide la introducción de los elementos tectónicos suficientes para relacionar la sismicidad con zonas de falla concretas. En este sentido, únicamente el terremoto de Lorca de 1977 ha sido asociado claramente a la Falla de Alhama de Murcia (Mezcua *et al.*, 1983), aunque el mecanismo de foco obtenido (de tipo normal) añadió complejidad a la caracterización sismotectónica de la falla, debido a que es incoherente con la cinemática de tipo oblicuo (inverso con componente de desgarre) reconocida durante la actividad neotectónica de la misma.

A una escala regional destacan los estudios que en los últimos años han intentado asociar la actividad sísmica en la Cordillera Bética a fallas o zonas de fallas concretas: López Casado *et al.* (1987) y Sanz de Galdeano *et al.* (1995). En estos trabajos se deducen aquellas fallas o zonas de falla que funcionan como fuentes sismogenéticas a tenor de la sismicidad tanto histórica como instrumental espacialmente relacionada con ella. En el segundo de ellos, correlacionan los epicentros de intensidad \geq VI y magnitud \geq 3,5 con fallas conocidas. En la figura 2 se aprecia que la FAM se puede considerar entre las más activas dentro del sureste peninsular.

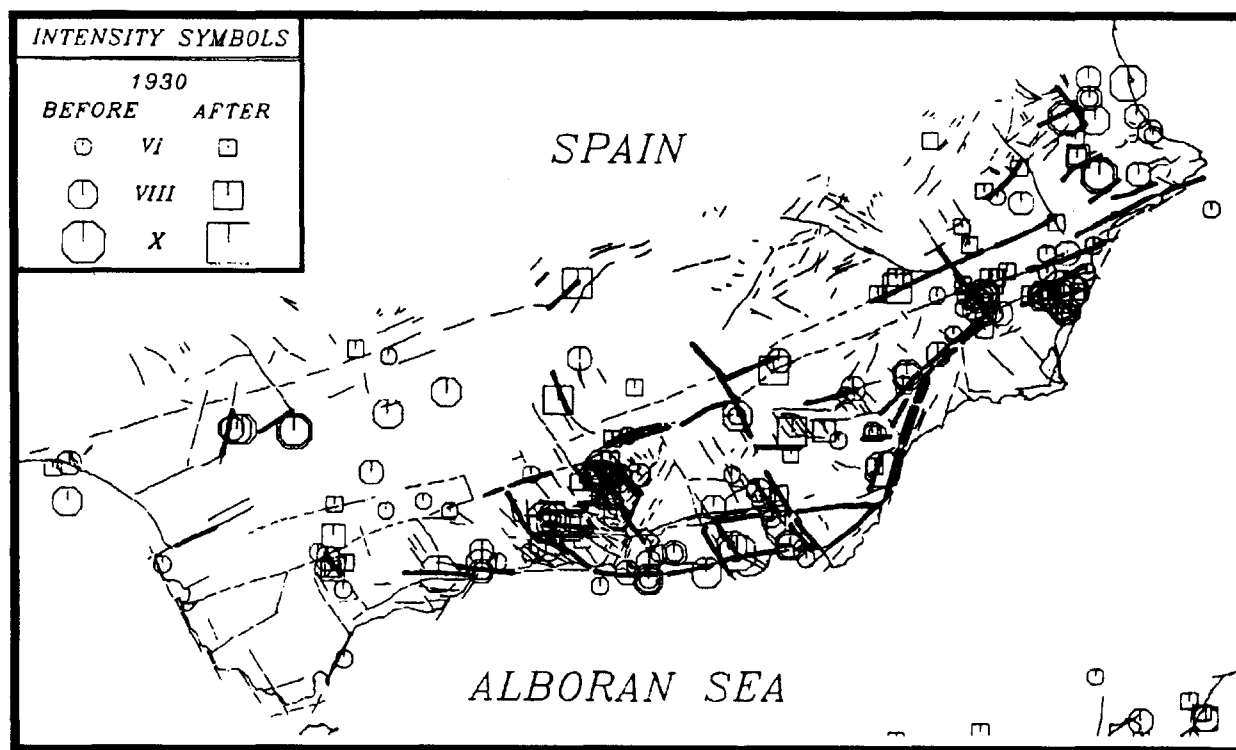


Fig. 2.—Fallas y segmentos de falla (representados con línea gruesa) que presentan relación genética con la sismicidad total acaecida en la Cordillera Bética; tomado de Sanz de Galdeado *et al.* (1995).

Datos sísmicos utilizados

Para el análisis de la sismicidad instrumental asociada a la FAM y su entorno, se han utilizado los datos del catálogo sísmico del Instituto Geográfico Nacional. Dicho catálogo incluye datos instrumentales desde el año 1920, si bien, los datos existentes para el intervalo 1920-1959 presentan poca precisión de localización (errores entre 10 y 60 km). Las magnitudes durante este período están subestimadas en 0,2 y 0,5 grados (MOPT-IGN, 1992). Los epicentros localizados entre 1960 y 1980 tienen mayor exactitud, aunque la red sísmica en aquella época presentaba un umbral de detección todavía elevado. La implantación y actualización de la actual Red Sísmica Nacional permite que desde el año 1980 los datos obtenidos presenten un error de localización horizontal escaso (en la gran mayoría de los casos inferior a 10 km) y un umbral de detección para la Cordillera Bética inferior a Mb: 2,0.

De los terremotos utilizados para el análisis espacio-temporal se eliminaron aquéllos con error de localización horizontal > 10 km. En la figura 3 se muestra la estadística de los errores de localización para los eventos seleccionados entre 1927 y 1994. Como puede observarse, la mayoría de los terremotos presentan errores horizontales y verticales infe-

riores a 5 km y un error cuadrático medio inferior a 0,75 s.

Para el estudio de la serie sísmica de Lorca se han utilizado los datos hipocentrales de las réplicas aportados por el IGN, que en el momento de producirse el evento tenía desplegada una red portátil en la zona, lo que permitió la detección de numerosas réplicas y premonitorios.

En cuanto a los datos de sismicidad histórica, se han utilizado los publicados en los listados oficiales del IGN (Mezcua y Martínez-Solares, 1983) y en los trabajos de recopilación llevados a cabo por López Marinas (1977a, b y 1978) y Martínez-Guevara (1984). Se han extraído observaciones descritas en dichos trabajos que presentan interés desde un punto de vista sismotectónico. En la tabla 1 se resumen dichas observaciones. A pesar de la exageración que en algunos casos llevan implícita esas descripciones fenomenológicas de sucesos sísmicos, algunas de ellas pueden ser indicios de deformaciones superficiales asociadas a los terremotos.

Sismicidad histórica

La relación intensidad-magnitud que se obtiene a partir de la población total de terremotos en el

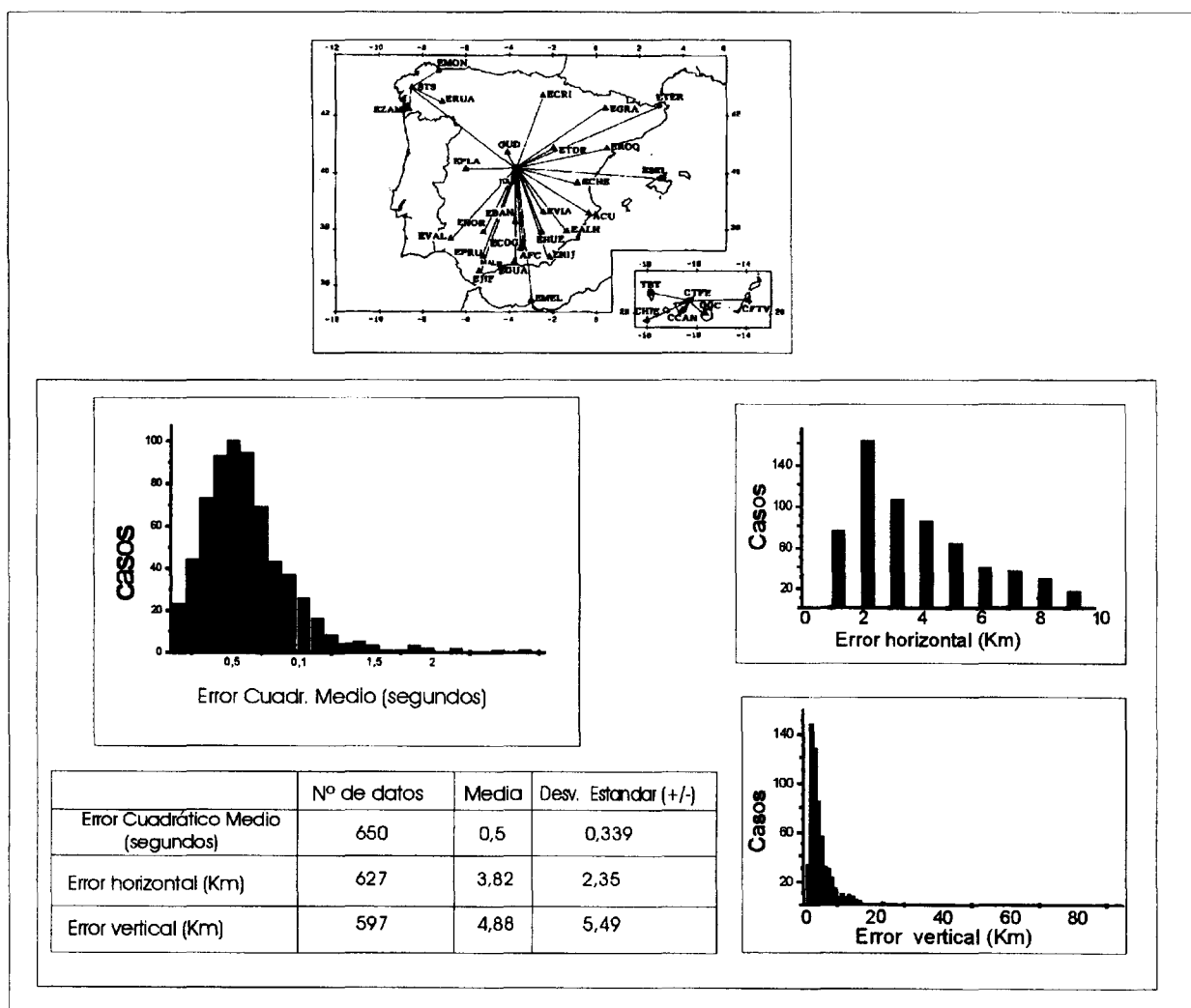


Fig. 3.—En la parte superior: mapa de situación de las estaciones de la Red Sísmica Nacional (tomado de IGN [1991]). En la parte inferior se representan los histogramas de los errores de localización de la población de terremotos utilizados en este trabajo, ocurridos en el sureste de la Cordillera Bética (período 1927-1994).

sureste de la Cordillera Bética (fig. 4) indica que los eventos de intensidad (MSK) = VIII pueden correlacionarse con magnitudes próximas o superiores a 5,0, mientras que los eventos de intensidad VII corresponden aproximadamente con magnitudes Mb: 4,5.

En el entorno de la FAM se han registrado más de diez terremotos con intensidad (MSK) > IV (fig. 5). De ellos, ocho presentan una intensidad > VI y algunos de ellos han provocado importantes daños. Destacan por su importancia los terremotos de Lorca de 1579, 1674 y 1818, el terremoto de Murcia de 1743, el terremoto de Totana de 1907, los terremotos de Lorquí y Torres de Cotillas de 1911 y finalmente el terremoto de Fortuna de 1944.

Por lo que se refiere a la disposición espacial de la sismicidad con intensidad > IV se caracteriza por situarse en el sector central de la FAM. La acumulación de los principales eventos históricos (etiquetados en la figura con su fecha) coinciden espacialmente con la posición de bastantes de los eventos instrumentales con intensidad > IV.

Es significativa la ausencia de actividad en el segmento Huércal Overa-Lorca y en el segmento más oriental (Alhama-Alcantarilla). Asimismo, es interesante la importante acumulación de eventos históricos en el valle del Segura al NO de la FAM. En ese sector existen varias fallas importantes de dirección paralela a la FAM, y muy próximas entre sí, que cruzan el valle: la prolongación oriental de la Falla Norbética, la Falla Mula-

Tabla 1.—Observaciones con implicaciones sismotectónicas relacionadas con algunos de los terremotos históricos más importantes ocurridos en el entorno de la Falla de Alhama de Murcia. Datos recopilados de López Marinas (1977a y b y 1978), y Martínez-Guevara (1984).

Localidad	Fecha	Intensidad (msk)	Observaciones
Lorca	20-1-1579	VIII	Vecinos desalojan la ciudad durante días. Muchas casas en ruinas y otras en peligro.
Lorca	28-8-1674	VIII	Serie sísmica compuesta de un evento principal de intensidad VIII y dos de VII, uno antes y otro después del principal. Se sintieron 12 terremotos previos al principal y réplicas diarias sentidas durante más de un mes. Un 25% de las edificaciones de Lorca, destruidas. Se hundieron las iglesias de San Pedro y San Indalecio. Decenas de muertos.
Lorca	20-12-1818	VII-VIII	Se hundieron unas tierras entre Lorca y Totana (¿ruptura superficial?). Se sintieron dos terremotos mayores.
Alhama de Murcia	11-11-1855	VII	Grietas en edificios, algunos hundimientos de casas y hundimiento de cuevas. Diez réplicas sentidas.
Lorquí-Cotillas	1911	VIII	Serie sísmica compuesta de dos terremotos principales de intensidad VIII (21 de marzo y 3 de abril separados pocos kilómetros. Tras el segundo, un puente de mampostería de 300 m en Molina se desvió quedando en forma de senoide desplazándose 10 cm a cada lado (¿ruptura superficial?). Casi 100 réplicas sentidas en las semanas siguientes. Las fuentes de Archena, Mula y Fortuna no variaron, sin embargo, el caudal del valle de Ricote aumentó bruscamente.

Archena y la propia prolongación hacia el NE de la FAM.

La serie sísmica de Lorca de 1674 muestra caracteres sismotectónicos interesantes (tabla 1). Presentó un premonitorio de intensidad VII 18 días antes del terremoto principal de intensidad VIII. Es una intensidad relativamente alta para considerarla como un premonitorio de una serie sísmica típica. Durante el terremoto de Lorca de 1818, se describe el «hundimiento de unas tierras entre Lorca y Totana», precisamente el sector donde la traza superficial de la FAM presenta mayores indicios de actividad paleosísmica (Martínez Díaz y Hernández Enrile, 1999). Esta observación podría referirse a una posible ruptura superficial que, sin embargo, no pudo identificarse en la exploración geológica de superficie. La zona está sometida a un alto grado de alteración antrópica, lo que puede haber influido en la desaparición de los posibles restos de la ruptura superficial.

Por otra parte, existen descripciones de fenómenos acompañantes de otros terremotos mayores (Lorquí, 1911 y Cotillas, 1911) que pueden ser indicativos de deformaciones superficiales. En este sentido, en los trabajos de nivelaciones de precisión de Giménez (1998), utilizando datos geodésicos del último siglo, se identifica un movimiento vertical de 0,4 mg/ka en la zona epicentral de los citados terremotos producido entre 1878 y 1978. Este movimiento es coherente con un hundimiento relativo de Murcia y Alcantarilla (depresión del Guadalentín) en relación con Molina de Segura

(situado al NO de la FAM). La mayor parte del movimiento identificado en ese estudio se sitúa en las nivelaciones realizadas para el intervalo 1878-1930. La actividad sísmica histórica registrada en esos años, y la ausencia de terremotos históricos de intensidad $I > VII$ a partir de 1911, llevan al citado autor a interpretar que ese movimiento responde a la deformación cosísmica ocasionada por los terremotos de Lorquí y Cotillas. Asimismo, es interesante hacer notar que la tasa de movimiento vertical media para todo el siglo, deducida a partir de estos datos, está dentro del mismo orden que la calculada para el Cuaternario utilizando criterios neotectónicos y dataciones radiométricas en el sector Lorca-Totana de la FAM por Martínez Díaz (1998).

Vemos, por tanto, que la sismicidad histórica acaecida en el entorno de la FAM durante los últimos 400 años indica que la zona ha estado sometida a eventos sísmicos de magnitudes elevadas, superiores a la máxima registrada instrumentalmente (4,2), que probablemente produjeron deformaciones superficiales relacionadas con la actividad de la FAM o de fallas secundarias asociadas.

Sismicidad instrumental

En la figura 6 se ha representado la sismicidad total ($M_b > 2,0$) con error de localización horizontal < 9 km en el entorno de la FAM. A grandes rasgos se observa que la sismicidad no aparece aline-

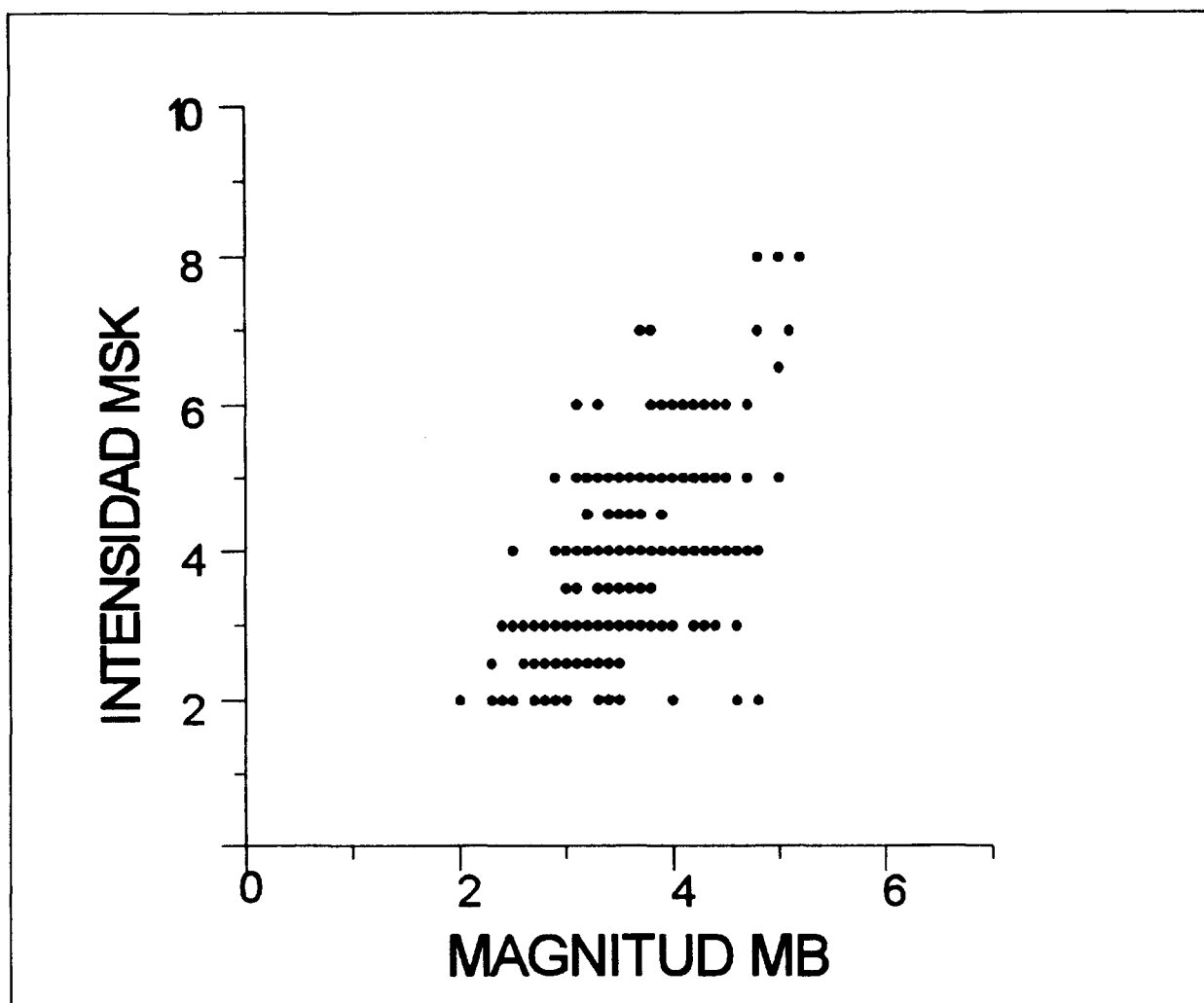


Fig. 4.—Relación Magnitud/Intensidad (MSK) para toda la población de terremotos del sureste de la Cordillera Bética.

ada según zonas de falla, sino que más bien se acumula en áreas determinadas. Se aprecia, en todo caso, que solamente en el sector Lorca-Alhama la sismicidad está claramente asociada a la FAM. Al igual que ocurría con la sismicidad histórica, existen dos tramos de la FAM casi carentes de epicentros. Uno al suroeste de Lorca (segmento de Huércal Overa-Lorca) y otro entre Totana y Alhama. Además, es evidente la existencia de actividad sísmica en el interior de la depresión del Guadalentín.

Entre los terremotos de mayor magnitud ocurridos sobre la FAM destaca el de Lorca de junio de 1977 con magnitud Mb: 4,2. En febrero de 1999 se produjo al norte de la FAM el terremoto de Mula de magnitud Mb: 5,0, que parece estar asociado en mayor medida a la actividad de la Falla de Crevillente.

Al igual que con la sismicidad histórica, se observa una acumulación de epicentros instrumentales en el valle del Segura al NO de la FAM. A partir del estudio gravimétrico de la depresión del Guadalentín, Martínez Díaz y Hernández Enrile (1998) han interpretado una serie de fallas ocultas bajo los depósitos cuaternarios. Tanto la sismicidad que se sitúa en el sector central de la depresión a la altura de la cuenca de Hinojar, como la observada en el entorno de Alcantarilla, puede estar asociada a dichas fallas. La denominada falla oculta de Librilla parece continuarse hacia el NE y de esa manera se añadiría al cortejo de fallas NE-SO identificadas transversalmente al valle del Segura. Este cortejo de fallas que podría explicar la alineación de sismicidad dispuesta a lo largo del valle (fig. 6), tradicionalmente relacionada con una supuesta falla NNO-SSE paralela a dicho valle y de longitud considera-

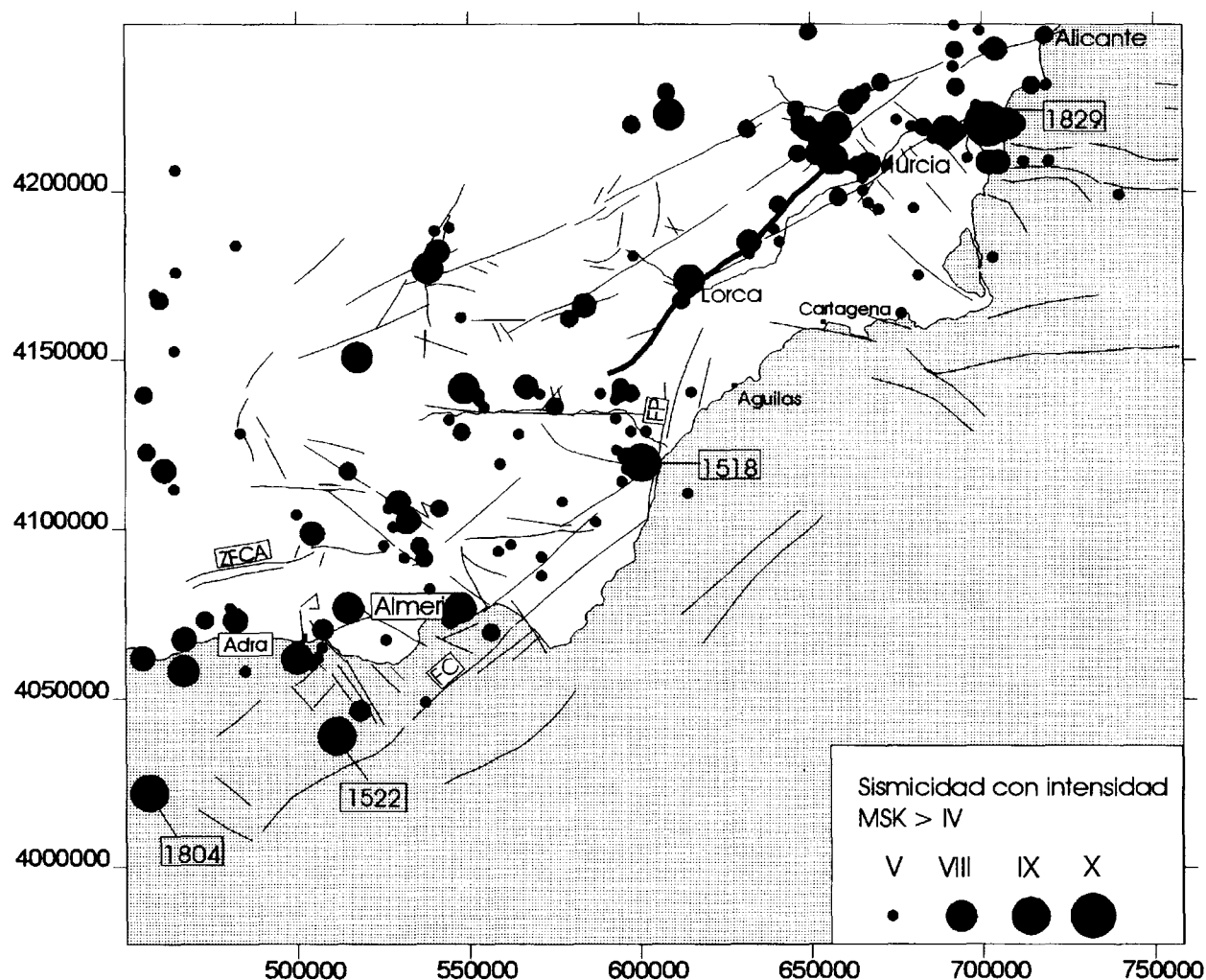


Fig. 5.—Mapa de la sismicidad de intensidad (MSK) > IV ocurrida en la zona de estudio. Se indican las fechas de los terremotos históricos más destructivos.

ble, pero de la que existe muy escasa expresión en superficie.

Por otra parte, es significativa la sismicidad instrumental presente al oeste de Lorca. En el interior de la Sierra de las Estancias se observa una actividad sísmica asociada a pequeñas fallas normales NE-SO.

De modo resumido se puede decir que la disposición espacial de la sismicidad instrumental en el entorno de la FAM no aporta datos muy precisos acerca de la actividad de fallas o segmentos concretos. Únicamente el sector Lorca-Totana parece «dibujarse» a través de la actividad sísmica. Si consideramos el conjunto de la sismicidad, observamos tanto la linealidad de la sismicidad que acompaña al segmento Lorca-Totana como el vacío de actividad en el segmento de Puerto Lumbreras al SO de Lorca.

Análisis de la serie sísmica de Lorca (junio de 1977)

El 2 de junio de 1977 se produjo al suroeste de Lorca un terremoto de magnitud M_b : 4,2. Este seísmo coincidió con la existencia en la zona de una red portátil de cinco sismógrafos instalados por el Instituto Geográfico Nacional, lo que permitió el registro de gran cantidad de premonitorios y réplicas con un error de localización pequeño.

Mezcua *et al.* (1984) realizaron un análisis e interpretación de los datos recogidos por la red. Calcularon el mecanismo de foco del evento principal y de varias agrupaciones de réplicas. Determinaron un mecanismo de foco de falla normal (fig. 7a) con planos nodales orientados NE-SO y un eje de extensión orientado NO-SE, es decir, paralelo a la dirección de

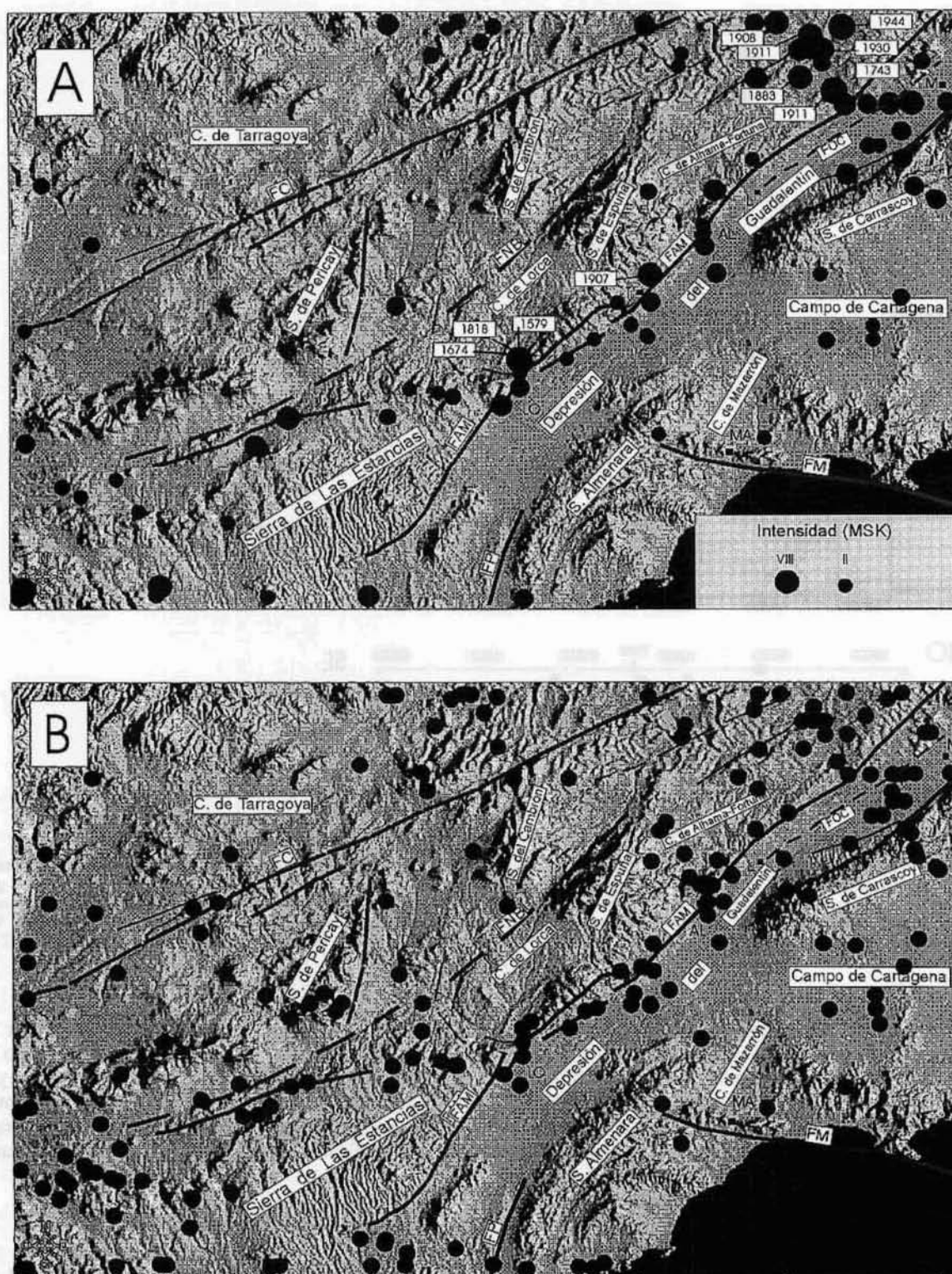


Fig. 6.—A: Actividad sísmica con intensidad (MSK) > II ocurrida en el entorno de la Falla de Alhama de Murcia. Se señalan las fechas de los eventos históricos de mayor intensidad; B: Sismicidad total de magnitud $M_b > 2.0$ con error de localización horizontal < 9 km. FAM: Falla de Alhama de Murcia; FNB: Falla Norbética; FM: Falla de las Moreras; FP: Falla de Palomares; FOC: Falla Oculta de Librilla; LO: Lorca; M: Murcia; L: Librilla; T: Totana; AL: Alhama de Murcia.

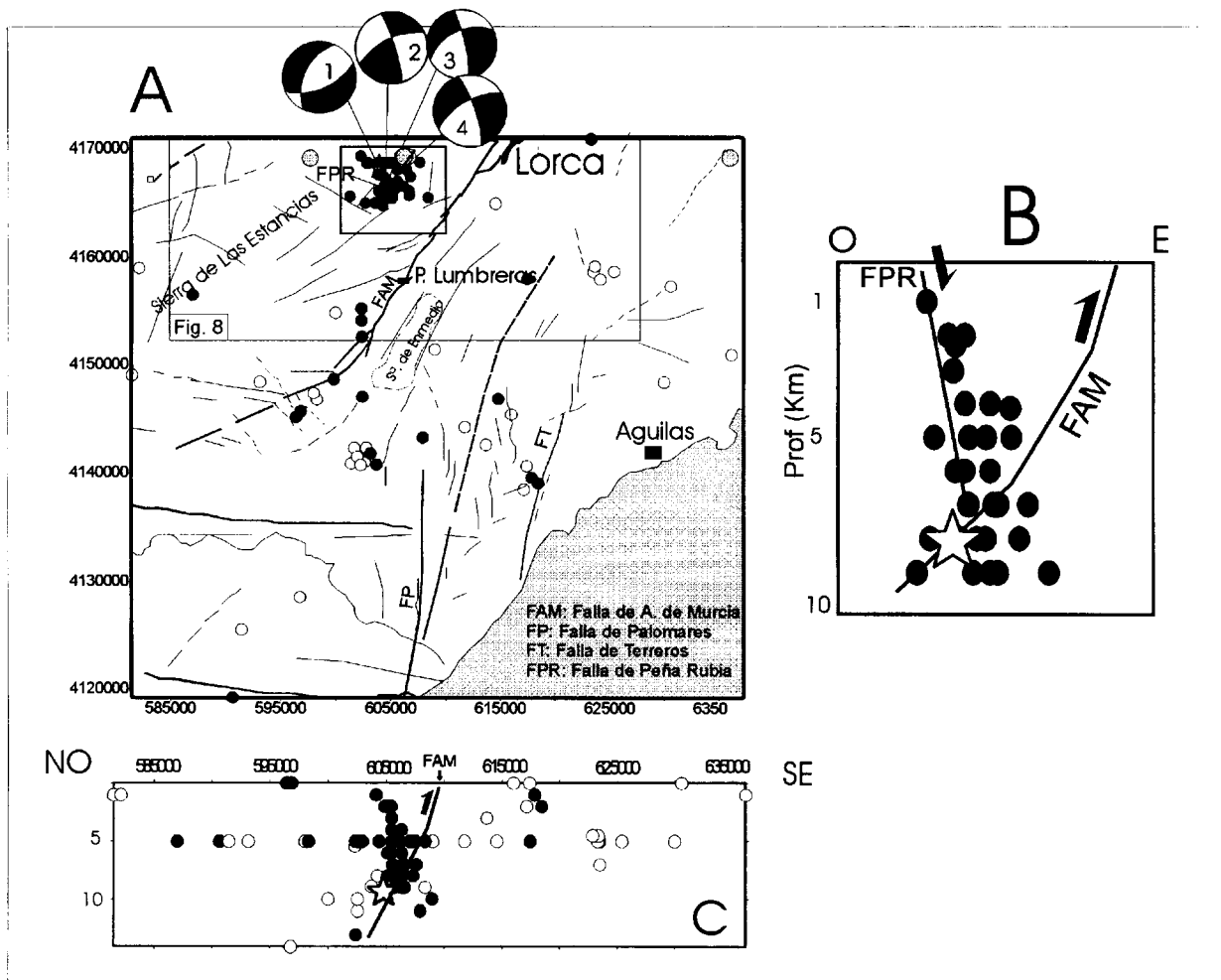


Fig. 7.—A: Mapa de fracturación reciente del tramo de la Falla de Alhama de Murcia al sur de Lorca, sobre el que se proyectan las réplicas (puntos negros) y los premonitorios (puntos blancos) de la serie sísmica de Lorca de junio de 1977. Los puntos grises representan las réplicas de mayor magnitud. B: Sección vertical de la nube de réplicas ocurridas junto al epicentro principal. C: Corte en sección orientada NO-SE del total de la serie sísmica. La estrella gris representa el hipocentro del evento principal. Sobre el mapa se indican asimismo los mecanismos de foco del evento principal (1) y los mecanismos conjuntos de las réplicas (2), (3) y (4). Véase explicación en el texto.

acortamiento regional mayoritariamente reconocida. Asimismo, calcularon los mecanismos de foco de numerosas réplicas encontrando que variaban considerablemente. De ellas, 44 presentaban mecanismos de tipo normal, y 21 de tipo inverso. La mayoría de las réplicas de magnitud $M_b > 2,0$ presentaron mecanismos normales. El mecanismo focal del evento principal es, por tanto, contradictorio con la cinemática inverso direccional de la FAM, con la que en un principio se relacionó este terremoto.

Herraiz y Mezcu (1979) determinaron el parámetro b (0,75) y estimaron la caída de esfuerzos y el momento sísmico asociado a este terremoto. A pesar de la escasez de datos válidos utilizables, los valores obtenidos, según estos autores, están en

consonancia con una zona caracterizada por una alta densidad de fracturación. Todo ello, junto con la distribución espacial de los premonitorios y las réplicas, hace que esta serie sísmica presente interesantes implicaciones tectónicas que hasta ahora no han sido suficientemente estudiadas ni discutidas.

Análisis espacial y mecanismos focales

Se han utilizado 96 eventos de la serie entre premonitorios y réplicas. Para su proyección en planta se seleccionaron los 79 eventos con menor error horizontal ($eh < 6$ km). Si proyectamos la serie sobre el mapa de fracturación cuaternaria (fig. 7a), se observa

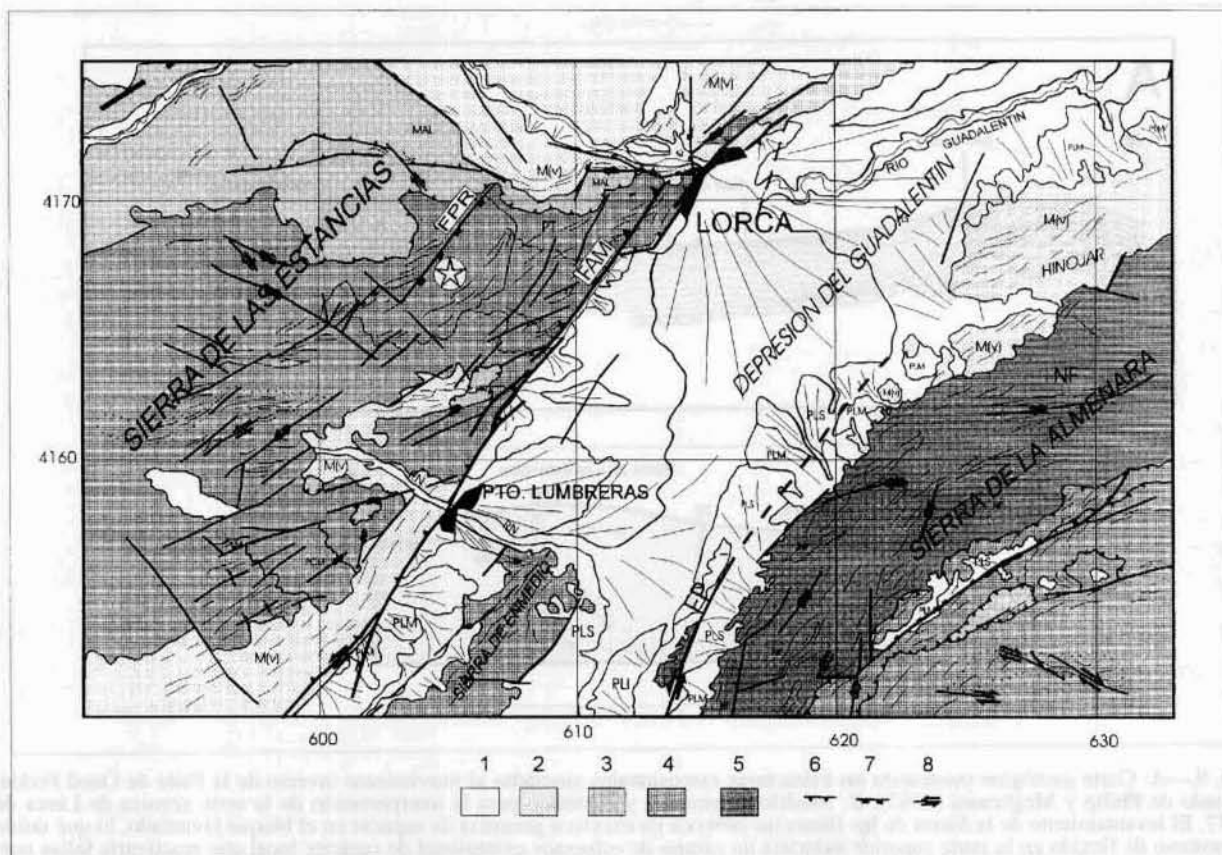


Fig. 8.—Mapa geológico del tramo Huércal Overa-Lorca de la Falla de Alhama de Murcia (FAM). FPR: Falla de Peñarubia. FP: Falla de Palomares. La estrella representa el epicentro principal de la serie sísmica de Lorca de 1977. Leyenda: 1: Depósitos cuaternarios (PLI: Pleistoceno Inferior; PLM: Pleistoceno Medio; PLS: Pleistoceno Superior); 2: Mioceno Superior (Mv); 3: Basamento Maláguide (MAL); 4: Basamento Alpujárride más unidades intermedias; 5: Basamento Nevado-Filábride; 6: Falla inversa; 7: Falla normal; 8: Falla de desgarre.

claramente que casi todos los premonitorios (puntos blancos en la figura) se producen al sureste de la FAM y algunos rodeando el macizo de basamento de la Sierra de las Estancias. La mayoría de las réplicas (puntos negros) se acumulan, sin embargo, en un enjambre situado al noroeste de la FAM.

Fuera de esa acumulación principal, destacan las réplicas que parecen asociadas al segmento más occidental de la FAM (suroeste de Puerto Lumbreras) y algunas próximas a la Falla de Palomares y a la Falla de Terreros y al sur de la Sierra de Enmedio. En un corte E-O de la serie (fig. 7b) se aprecia que la nube de réplicas presenta una geometría bastante vertical y algo alejada de la traza de la FAM. Si bien, considerando un buzamiento NO para esta falla, tal y como se aprecia en el campo, el hipocentro podría situarse cerca del plano de falla. Se observa, asimismo, que las réplicas y premonitorios asociados a la FAM, junto con el núcleo situado al sur de la Sierra de Enmedio, alcanzan mayores profundidades que las situadas en zonas más alejadas de la falla.

Para identificar la superficie de ruptura responsable de la serie, hemos seleccionado las 30 réplicas próximas al epicentro con un error vertical ≤ 2 km. Se realizaron secciones de esas réplicas según diferentes orientaciones encontrando que la menor anchura de la nube se observó en la sección NO-SE (fig. 7b). Las réplicas se presentan con profundidades que van de 1 a 10 km, y parecen disponerse según un plano casi vertical o con ligero buzamiento hacia el este. Por otra parte, el hipocentro del evento principal se sitúa en la base de la nube de réplicas, de lo que parece deducirse una propagación de la ruptura hacia arriba.

En la misma figura también se muestran los tres mecanismos focales conjuntos que obtuvieron Herraiz y Mezcuca (1979) para tres agrupaciones de réplicas. Estos mecanismos presentan una fuerte componente de desgarre, con ejes de presión que varían notablemente entre NO-SE y NE-SO.

En cuanto a la relación entre la disposición de la sismicidad y las estructuras neotectónicas locales,

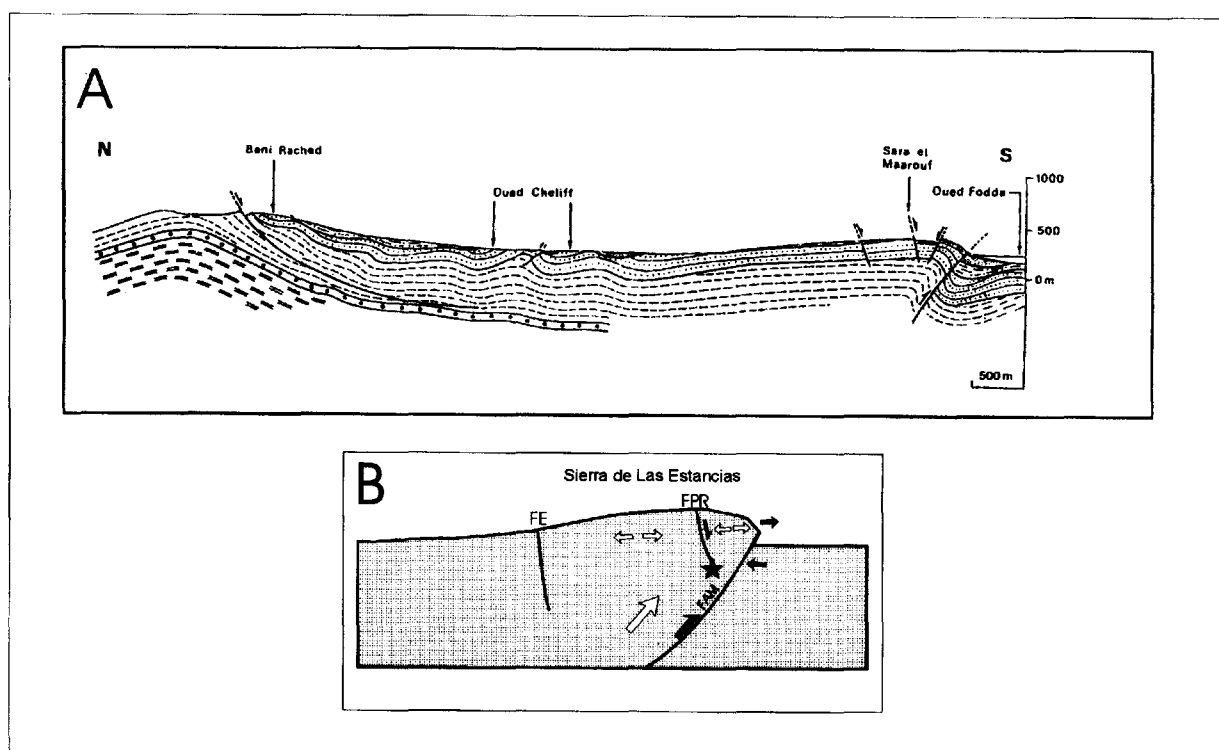


Fig. 9.—A: Corte geológico mostrando las estructuras extensionales asociadas al movimiento inverso de la Falla de Oued Fodda, tomado de Philip y Meghraoui (1983). B: Modelo cinemático y dinámico para la interpretación de la serie sísmica de Lorca de 1977. El levantamiento de la Sierra de las Estancias provoca un exceso o ganancia de espacio en el bloque levantado, lo que unido al proceso de flexión en la parte superior induciría un campo de esfuerzos extensional de carácter local que reactivaría fallas normales subparalelas a la Falla de Alhama. FAM: Falla de Alhama de Murcia; FPR: Falla de Peñarrubia; FE: Falla de las Estancias. La estrella señala el epicentro del terremoto de Lorca de 1977 (Mb: 4,2).

cabe destacar que la nube principal de réplicas se dispone en la vertical de una zona de falla normal que hemos denominado Falla de Peña Rubia. Esta falla limita afloramientos cuarcíticos y dolomíticos alpujárrides con una orientación N 40-45, subparalela a la FAM (véase mapa geológico de la fig. 8). Asociada a esta falla no se observan depósitos cuaternarios deformados, sin embargo, presenta una zona de fracturación frágil que induce a pensar en una actividad miocena para la misma. En el corte B de la figura 7 se representa la posición de esta falla, así como la de la FAM en relación con la nube de réplicas. Esta nube parece estar asociada en mayor medida con el plano de la Falla de Peña Rubia.

De la disposición espacial de la serie así como de los parámetros focales se pueden resumir las siguientes evidencias que la caracterizan y deben ser explicadas tectónicamente:

Casi la totalidad de los premonitores se localizan al SE de la FAM y presentan menores profundidades que las réplicas.

La nube de réplicas próxima al hipocentro principal no se adapta a un plano buzando al SO, sino

más bien a un plano subvertical o incluso con buzamiento SE y dirección norcada. Con esta disposición y teniendo en cuenta el alejamiento que presenta de la traza de la FAM, la falla responsable de la serie debería ser otra.

El mecanismo focal del evento principal responde a una falla normal bastante pura con planos nodales orientados NE-SO.

Un tercio de los mecanismos de foco de las réplicas calculados por Mezcua *et al.* (1984) son de falla inversa, y dos tercios de tipo normal. Ello es un indicio de cierta complejidad dinámica en la zona que estaría sometida a compresión y extensión en sectores muy próximos entre sí.

La posición de la nube principal de réplicas coincide con una de falla normal (Falla de Peñarrubia) de orientación NNE-SSO.

Interpretación tectónica

La observación de la serie sísmica y su relación con las fallas neotectónicamente activas de la zona,

permiten realizar una interpretación tectónica de la misma. En primer lugar, la localización de casi todos los premonitorios al sureste de la FAM parecen estar indicando un aumento de esfuerzos desviadores previo a la ruptura principal en esa zona. Esta concentración de esfuerzos reactivó pequeñas fracturas relacionadas con las zonas de Falla de Palomares y de Terreros.

El mecanismo focal de falla normal para el evento principal es totalmente incompatible con la cinemática observada para la FAM a lo largo del período neotectónico, así como con la dirección de acortamiento regional deducida para el sureste de la Cordillera Bética, tanto a partir de criterios geológicos como sísmológicos y geodinámicos (Galindo Zaldívar *et al.*, 1993). Esto induce a pensar en la existencia de un mecanismo local perturbador del campo de esfuerzos regional, capaz de reactivar como normales fallas orientadas perpendicularmente a la dirección de acortamiento. O sea, un mecanismo capaz de inducir una permutación en el tensor de esfuerzos actual (concretamente entre los ejes σ_1 y σ_2).

Para explicar dichas fallas normales se propone una permutación local del tensor en el bloque levantado, mecanismo ya descrito en otras zonas de falla inversa como, por ejemplo, la Falla de El Assnam (Philip y Meghraoui, 1983) semejante a la FAM, tanto en geometría como en cinemática y en situación geodinámica. La actividad inversa de zona de la Falla de El Assnam y otras similares de la zona induce una extensión asociada a una flexión y plegamiento del bloque levantado (fig. 9), que es coherente con un acortamiento NNO-SSE.

Para la génesis de la serie sísmica de Lorca proponemos un modelo similar que estaría relacionado con el levantamiento y plegamiento de la Sierra de las Estancias asociados a la actividad inverso-direccional de la FAM (fig. 9). Según este modelo, la actividad de la FAM, que limita la Sierra de las Estancias por el SE, induce un levantamiento asimétrico de la misma. En el bloque levantado se producirían dos efectos que pueden explicar un tensor local extensional; por un lado, flexión o plegamiento asociado al movimiento inverso de la falla, y, por otro, una extensión en la parte superior de la corteza debida al aumento de la superficie libre en el bloque elevado. Al elevarse el bloque NO, la parte superior del mismo gana espacio lateral y puede llegar a extenderse o al menos inducir una permutación en los ejes del tensor de esfuerzos. En este marco dinámico es posible la activación de fallas normales paralelas a la FAM situadas en el interior de la sierra. Este es el caso de la Falla de Peña Rubia.

La ruptura de la Falla de Peña Rubia podría estar limitada por el propio plano de falla de la FAM que

pasa bajo la nube principal de réplicas (fig. 7b y c). La activación de la FPR tan próxima a la FAM induce reactivaciones de pequeñas fracturas inversas paralelas a la FAM o incluso pequeños segmentos de la FAM próximos a la zona hipocentral. Ello explicaría la existencia de réplicas con mecanismos de tipo normal y de tipo inverso entre las réplicas registradas.

Discusión y conclusiones

En los casos de terremotos de magnitudes medias (entre 3,5 y 5,5) en los que no existen indicios de deformación en superficie, es frecuente relacionar su génesis con las fallas activas de mayor importancia regional que se encuentren próximas a los epicentros. En el caso del terremoto de Lorca de 1977, tanto las observaciones de tipo geológico-estructural como el análisis de los datos sísmológicos, mecanismos focales, distribución de réplicas, etc., apuntan a la reactivación de fallas de segundo orden próximas a la FAM como las responsables de esa serie. Apoyando esta idea, en el sector Lorca-Totana son abundantes las fallas normales subparalelas a la FAM y situadas en el bloque levantado por la actividad inversa de la misma.

La conexión dinámica entre la actividad inverso-direccional de la FAM y la actividad normal de las fallas incluidas en el bloque levantado por ella, que como vemos puede generar terremotos de $M_b > 4,0$, constituyen además una evidencia indirecta de la actividad actual de la propia FAM. Las dimensiones de ésta, así como las deformaciones paleosísmicas identificadas sobre la misma en el sector Lorca-Totana (Martínez Díaz y Hernández Enrile, 1999), apoyan la potencialidad sismogénica de esta falla, que puede generar eventos sísmicos de magnitud $M_b > 7,0$.

En el capítulo de introducción se citaron algunos trabajos recientes dirigidos al estudio de las perturbaciones de los esfuerzos en el entorno de una falla activada sísmicamente. De la mayoría de esos trabajos se extraen observaciones de fenómenos de fracturación que indican que las zonas de fallas mayores están compuestas por segmentos menores capaces de generar terremotos de gran magnitud. Cuando se produce un evento sísmico sobre un segmento determinado, el campo de esfuerzos efectivos sobre los planos de falla adyacentes a esos segmentos es modificado, y esta modificación puede favorecer o inhibir posteriores rupturas (Cocco *et al.*, 1999). La interacción de fallas activas, por tanto, puede modificar las probabilidades de ocurrencia de futuros terremotos; ello hace que sea muy importante la determinación de esos cambios del estado de

esfuerzos con el fin de evaluar correctamente la peligrosidad sísmica de una zona.

Por tanto, en zonas como el sur de la Península Ibérica, a la hora de realizar evaluaciones de peligrosidad sísmica, resulta imprescindible el estudio de las relaciones dinámicas entre la actividad de la fracturación secundaria y la de las fallas de primer orden: motor cinemático que puede disparar su actividad. En este caso, la Falla de Alhama de Murcia es la falla activa de mayor longitud del área y se encuentra acompañada por numerosas fallas secundarias de dimensiones que van desde 2 km hasta 15 ó 20 km. Muchas de estas fallas no han sido reconocidas como activas durante el período neotectónico debido a que, al encontrarse en los relieves levantados por la actividad de la FAM, no aparecen afectando a materiales neógenos o cuaternarios que rellenan las cuencas. Es probable, sin embargo, como se ha mostrado en este estudio, que muchas de ellas puedan ser sísmicamente activas. Por ello, parece necesaria la modelización de las modificaciones de los esfuerzos y las deformaciones producidas por la actividad de las fallas de primer orden, y la determinación de en qué medida influyen en la estabilidad de las fallas secundarias de su entorno.

Entre las conclusiones más importantes que podemos resumir del estudio sismotectónico de la FAM y, más concretamente, del análisis y reinterpretación de la serie sísmica de Lorca (junio de 1977) destacamos las siguientes:

La FAM controla la disposición de la actividad sísmica histórica, pero no se observa lo mismo con la instrumental.

Algunas observaciones de fenómenos asociados a la sismicidad histórica más importante pueden indicar la posible existencia de rupturas superficiales cosísmicas asociadas a la actividad de la FAM. Las observaciones geodésicas de Giménez (1998) parecen indicar la existencia de deformación superficial durante los terremotos de Lorquí y Cotillas ocurridos en 1910. Es lógico suponer que los terremotos de Lorca de 1674 y 1818, ambos de intensidad VIII, pueden haber inducido deformaciones superficiales.

La serie sísmica de Lorca (1977) constituye un ejemplo de perturbación local del campo de esfuerzos comprensivo regional capaz de inducir rupturas sísmicas de cierta importancia asociadas a la reactivación de fallas secundarias dinámicamente relacionadas con la actividad de la FAM. El movimiento inverso de la FAM induce la formación y/o reactivación sísmica de fallas normales paralelas a ella, situadas en el interior del bloque levantado.

La Cordillera Bética se caracteriza por presentar una alta densidad de fracturación activa fuera de lo que son las grandes zonas de falla. Abundan las fallas de poca longitud (de 1 a 15 km) que poten-

cialmente pueden generar eventos de $M_b > 4,5$ con intervalos de recurrencia pequeños. La elevada dispersión espacial de la sismicidad, independientemente de su magnitud, apoya esta observación. De todo ello se desprende la necesidad de prestar mayor importancia a la actividad de fallas secundarias asociadas a zonas de falla mayores.

Los resultados obtenidos así como la cartografía realizada constituyen la base para posteriores estudios de modelización de esfuerzos generados por reactivaciones sísmicas de la Falla de Alhama de Murcia. Estas modelizaciones pueden dar información acerca de cuáles son las fallas secundarias que se están cargando de esfuerzos más rápidamente debido a la actividad de la FAM, lo que implicaría ciclos sísmicos más rápidos y, por tanto, menores períodos de recurrencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto AMB97-0523 titulado: «Análisis de la tectónica activa y su aplicación a la determinación de la peligrosidad sísmica en la Región de Murcia» financiado por la CICYT. Agradezco a J. L. Hernández Enrile por sus aportaciones y valiosas discusiones en los trabajos de campo así como en la crítica del trabajo. Asimismo, agradezco a Carlos Sanz de Galdeano por la revisión del trabajo y por sus sugerencias.

Referencias

- Argus, D. F., Gordon, R. G., Demets, C. y Stein, S. (1989). Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault. *J. Geophys. Res.*, 94: 5585-5602.
- Baena, J., Barranco, L. M., Zazo, C., Goy, J. L., Silva, P. G., Somoza, L., Bardají, T., Estévez, A., Sanz de Galdeano, C. y Rodríguez, T. (1993). Mapa neotectónico, sismotectónico y de actividad de fallas de la Región de Murcia Escalas 1:200.000 y 1:100.000. ITGE-CARM.
- Bousquet, J. C. y Montenat, C. (1974). Presence de décrochements NE-SW plioquaternaires dans les Cordillères Bétiques Orientales (Espagne). Extension et signification général. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 278: 2617-2620.
- Cocco, M., King, G. C. P. y Nostro, C. (1999). Fault Interaction and Stress Changes: Recent Advances and New Horizons. Report for the CE. FAUST Project. Alicante, January 1999. http://faust.ismes.it/reports/ing/State-Art_def.html.
- Fallot, P. (1948). Les Cordillères Bétiques. *Estudios Geol.*, 8: 83-172.
- Fernex, F. (1964). Tectonique et paléogéographie du Bétique et du Pénibétique orientaux. Transversale de La Paca-Lorca-Aguilas (Cordillères Bétiques, Espagne Méridionale). Thèse, Paris, 983 págs.
- Galindo-Zaldívar, J., González Lodeiro, F. y Jabaloy, A. (1993). Stress and paleostress in the Betic-Rif Cordilleras (Miocene to Present), *Tectonophysics*, 227: 105-126.

- Gauyau, F., Bayer, R., Bousquet, J. C., Lachaud, J. C., Lesquer, A. y Montenat, C. (1977). Le prolongement de l'accident d'Alhama de Murcia entre Murcie et Alicante (Espagne meridionale). *Bull. Soc. Geol. France*, 19: 623-629.
- Giménez, J. (1998). Quantificació de les deformacions verticals a l'est de la península Ibérica a partir d'anivellaments topogràfics de precisió. *Institut Cartogràfic de Catalunya, monografies tècniques*, n.º 5, 363 pàgs.
- Harris, R. A. y Simpson, R. W. (1992). Changes static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake. *Nature*, 360: 251-254.
- Harris, R. A., Simpson, R. W. y Reasenber, P. A. (1995). Influence of static stress changes on earthquake locations in southern California, *Nature*, 375: 221-224.
- Herraiz, M. y Mezcua, J. (1979). Aplicación del análisis espectral al sismo de Lorca del 6 de junio de 1977. Determinación de los parámetros focales. *III Asamblea Nac. Geod. y Geofísica, Inst. Geogr. Nac. Madrid*: 395-417.
- Hodgkinson, K. M., Stein, R. S. y King, G. C. P. (1996). The 1954 Rainbow Mountain-Fairview Peak-Dixie Valley earthquakes: A triggered normal faulting sequence. *J. Geophys. Res.*, 101: 25459-25471.
- IGN (1991). Spanish National Seismic Network. En: *Seismicity, seismotectonics and seismic risk of the Ibero-Maghrebian Region*. (J. Mezcua y A. Udías, eds.), Instituto Geográfico Nacional Monografía, n.º 8: 3-15.
- Kampschuur, W. (1972). Geology of the Sierra de Carrascoy (SE Spain) with emphasis on alpine polyphase deformation. *GUA Papers of Geology*. Univ. Amsterdam, ser. 1, 4, 114 pàgs.
- King, G. C. P., Stein, R. S. y Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84: 935-953.
- Larouzière, D., Bolze, J., Bordet, P., Hernández, J., Montenat, C., y Ott D'Estevou, P. (1988). The betic segment of the lithospheric Transalboran Shear Zone during the Late Miocene. *Tectonophysics*, 152: 41-52.
- López Casado, J. M., Estévez, A., Pina, J. A. y Sanz de Galdeano, C. (1987). Alineaciones sismotectónicas en el sureste de España. Ensayo de delimitación de fuentes sísmicas. *Mediterránea*, 6: 5-38.
- López Marinas, J. M. (1977a). Terremotos históricos en Almería. Hidroeléctrica Española. Informe interno, 100 pàgs.
- López Marinas, J. M. (1977b). Terremotos históricos en Murcia. Hidroeléctrica Española. Informe interno, 90 pàgs.
- López Marinas, J. M. (1978). Terremotos históricos acaecidos en las provincias de Murcia y Alicante. *Címbra*, 155: 4-16.
- Martínez Díaz, J. J. (1991). Tectónica y cinemática de la zona de Falla de Alhama de Murcia (sector Lorca-Totana). Sus implicaciones en el origen y evolución de las depresiones pliocuaternarias de Lorca y Guadalen-tín (Murcia). Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid, 90 pàgs.
- Martínez Díaz, J. J. y Hernández Enrile, J. L. (1992). Tectónica reciente y rasgos sismotectónicos en el sector Lorca-Totana de la Falla de Alhama de Murcia. *Estudios Geol.*, 48: 153-162.
- Martínez Díaz, J. J. y Hernández Enrile, J. L. (1996). Origen y evolución neotectónica de la Sierra de la Ter-cia. Contribución a la segmentación tectónica de la Falla de Alhama de Murcia. *VI Conferencia Internacional de Geología Ambiental y Ordenación del Terri-torio*. vol. II, Granada: 479-496.
- Martínez Díaz, J. J. (1998). Neotectónica y Tectónica Activa del sector centro-occidental de Murcia y sur de Almería, Cordillera Bética (España). Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 466 pàgs.
- Martínez Díaz, J. J. y Hernández Enrile, J. L. (1998). Fallas ocultas y fuentes sismogénicas en el interior de la depresión tectónica del río Guadalentín (Murcia). *1.º Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geo-física y IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*. Programa y resúmenes, pág. 147.
- Martínez Díaz, J. J. y Hernández Enrile, J. L. (1999). Segmentación tectónica de la Falla de Alhama de Murcia y actividad paleosísmica asociada. Contribución a la determinación de la peligrosidad sísmica en la región de Murcia. I Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, tomo 1.º: 75-87.
- Martínez Guevara, J. B. (1984). Temblores de tierra del núcleo sísmico de Lorca-Totana (Murcia). Estudio de sismicidad histórica. *IGN Original*, n.º 51.
- Mezcua, J. y Martínez Solares, J. M. (1983). Sismicidad del área Ibero-Mogrebí. *IGN Publ.*, n.º 262, Madrid, 322 pàgs.
- Mezcua, J., Herraiz, M. y Buforn, E. (1984). Study of the 6 June 1977 Lorca (Spain) earthquake and its afters-hocks sequence. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 74: 167-179.
- Montenat, C. (1973). Les formations néogènes du levant espagnole. Thèse Sciences, Orsay, 1.170 pàgs.
- Montenat, C. (1977). Les bassins néogènes du Levant d'Alicante et de Murcie (Cordillères Bétiques Orienta-les. Espagne). Stratigraphie, paleogéographie et évolu-tion dynamique. *Doc. Lab. Géol. Fac. Sc. Lyon*, 69, 345 pàgs.
- Montenat, C., Ott D'Estevou, P. y Masse, P. (1987a). Tectonic-sedimentary characters of the Betic Néogène Bassins evolving in a crustal transcurrent shear zone (SE Spain). *Bull. Centres. Rech. Explo. Prod. Elf Aqui-taine*, 11: 1-22.
- Montenat, C., Ott D'Estevou, P., Larouzière, F. D. y Bedu, P. (1987b). Originalité géodynamique des basins néogènes du domaine Bétique oriental (Espagne). *Notes et Mém. CFP*, Paris, 21: 11-50.
- MOPT-IGN (1992). Análisis sismotectónico de la Penín-sula Ibérica, Baleares y Canarias. Escala 1:1.000.000. Publicación Técnica, n.º 26. *IGN*, Madrid.
- Nostro, C., Stein, R. S., Cocco, M., Belardinelli, M. E. y Marzocchi, W. (1998). Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthqua-kes, Italy, by elastic stress transfer. *J. Geophys. Res.*, 103: 24487-24504.
- Oliveros, M. A. (1987). Estudio tectónico-cinemático de la fracturación reciente en el borde oriental y surorien-tal de la Sierra de las Estancias (Murcia y Almería). Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid, 100 pàgs.
- Philip, H. y Meghraoui, M. (1983). Structural analysis of the surface deformations of the El Asnam earthquake of October 10, 1980. *Tectonics*, 2 (1): 17-49.
- Rodríguez Estrella, T. (1986). La neotectónica de la Región de Murcia y su incidencia en la ordenación del

- territorio. *I Jorn. de Est. del Fenóm. Sísmico y su incidencia en la Orden. del Territorio*. Instituto Geográfico Nacional, Murcia.
- Rodríguez Estrella, T., Mancheño, M. A., Guillén, F., López Aguayo, F., Arana, R. y Serrano, F. (1992). Tectónica y sedimentación neógena en la Cuenca de Lorca (Murcia). *III Congreso Geológico de España y VII Congreso Latinoamericano de Geología*. Simposios, tomo I, Salamanca: 201-207.
- Sanz de Galdeano, C., López Casado, C., Delgado, J. y Peinado, M. A. (1995). Shallow seismicity and active faults in the Betic Cordillera. A preliminary approach to sources associated with specific faults. *Tectonophysics*, 248: 293-302.
- Stein, R. S., King, G. C. P. y Lin, J. (1992). Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake. *Science*, 258: 1328-1332.
- Stein, R. S., King, G. C. P. y Lin, J. (1994). Stress triggering of the 1994 M = 6.7 Northridge, California, earthquake by its Predecessors. *Science*, 265: 1432-1435.
- Stein, R. S., Barka, A. A. y Dieterich, J. H. (1997). Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys. J. Int.*, 128: 594-604.
- Silva, P. (1994). Evolución geodinámica de la Depresión del Guadalentín desde el Mioceno Superior hasta la actualidad: Neotectónica y Geomorfología. Tesis Doctoral. Universidad Complutense, 642 págs.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., Bardají, T., Somoza, L., Dabrio, C. J. y Lario, J. (1992). Evaluación geomorfológica de la actividad tectónica cuaternaria a lo largo de frentes montañosos de falla en el SE de España. *III Congreso Geológico de España y VII Congreso Latinoamericano de Geología*. Actas, tomo 2, Salamanca: 96-100.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C., Lario, J. y Bardají, T. (1997). Paleosismic indications along «aseismic» fault segments in the Guadalentín depression (SE Spain). *J. Geodynamics*, vol. 24, 1-4: 105-115.
- Toda, S., Stein, R. S., Reasenber, P. A., Dieterich, J. H. y Yoshida, A. (1998). Stress transferred by the 1995 Mw = 6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res.*, 103, 10: 24543-24566.

Recibido el 4 de noviembre de 1999.
Aceptado el 29 de diciembre de 1999.